

## 土石流による河床材料の侵食限界に関する研究

立命館大学理工学部  
立命館大学大学院

正会員  
学生員

伊藤隆郭\*  
吉田佳祐\*

立命館大学理工学部  
立命館大学大学院

正会員 江頭進治\*  
学生員 衛藤祐介\*

**1. はじめに** 土石流の発達過程の規模は、河床堆積物の取り込みに依存し、土石流本体に含まれる粒子径と河床の粒子径が等しい場合には、それは河床勾配と平衡勾配、もしくは土石流の粒子濃度と平衡濃度の差に依存することが認められている。ところが、河床の粒子径が土石流本体のそれと異なる場合には、土石流の河床材料の侵食能力に及ぼす河床の粒子径の影響が大きいものと推察される。本研究においては、土石流による河床材料の取り込み限界（侵食限界）について、以前の著者らの研究<sup>1)</sup>を踏まえながら、実験データを用いて検討する。

**2. 実験概要** 実験は幅 10.0cm、長さ 12.0m の矩形断面水路を用いている。水路は上流側において所定の土石流を形成させる区間（長さ 約 4.0m）と、下流側において河床材料の侵食を調べる区間（長さ 3.0m）から構成されており、これらは堰板（高さ 10.0cm）によって分割されている。上流側では、侵食区間へ供給される土石流の流量・流砂量をコントロールするために、供給材料を用いて上流端から供給される土石流の平衡勾配に設定されている。下流側では、下流端に高さ 10.0cm の堰板が設置され、2 枚の堰板間に砂礫を敷き詰めて、土石流による侵食を調べるための河床が形成されている。なお、侵食区間の上流端近傍には、土石流の流入に伴う河床材料の擾乱を防ぐためのステップ・プール型の対策工を施している。侵食区間の河床材料には、平均粒径  $d = 0.218\text{cm}$ 、 $0.438\text{cm}$ 、 $0.8\text{cm}$ 、 $1.1\text{cm}$  の 4 種類の砂礫を用いた。以後、給砂材料の平均粒径には  $d_0$ 、河床材料の平均粒径には  $d$  の記号をそれぞれ用いる。実験においては、上流端から混合物の単位幅流量がほぼ  $100\text{ cm}^2/\text{s}$  となるように定常的に与えて、輸送濃度  $c_f$  は、 $0.05$ 、 $0.1$ 、 $0.15$  のケースを設定している。測定項目は、水路下流端における混合物の流量（水 + 土砂）の時間変化、河床侵食区間における河床形状、河床侵食区間の定点における河床高  $z_b$  および水深  $h$  の時間変化である。さらに、侵食区間河床材料の取り込みが見られなくなるまで給水・給砂を行い、その時点で平衡状態が得られているものとして、水位の縦断分布と流速の鉛直分布  $u(z)$  を計測し、通水停止後の河床縦断分布（最終河床形状）を測定している。

**3. 実験データの解析** 図 - 1 は、上流から供給される土石流の輸送濃度  $c_f = 0.10$  のケースにおいて、 $d = 0.218\text{cm}$ 、 $0.438\text{cm}$ 、 $0.8\text{cm}$  の場合における侵食区間の河床最終形状を示している。なお、図において、点線で示しているのは、給水・給砂開始前の初期河床高（水路床より  $10.0\text{cm}$ ）であり、破線は  $d = d_0$  の場合に予想される平衡河床である。 $d = d_0 = 0.218\text{cm}$  の時には、点線の平衡河床にほぼ一致している。また、河床材料の粒子径  $d$  の違いによる河床高の変化に着目すると、 $d$  が大きいほど最終河床高が高くなっていることが確認できる。すなわち、 $d$  が大きいほど侵食が抑制さ

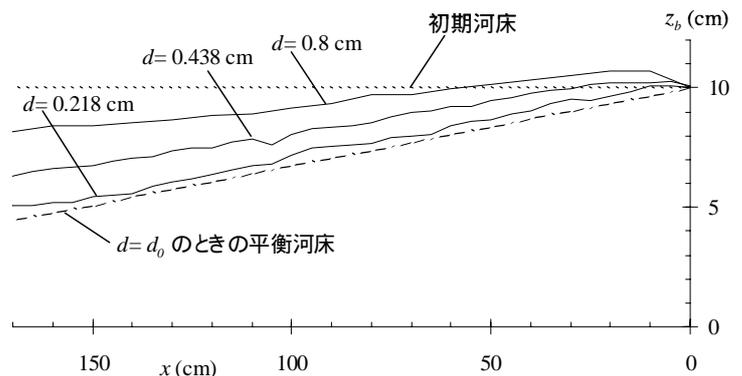


図 - 1 最終河床位の縦断分布 ( $c_f = 0.0981$ : 平衡状態)

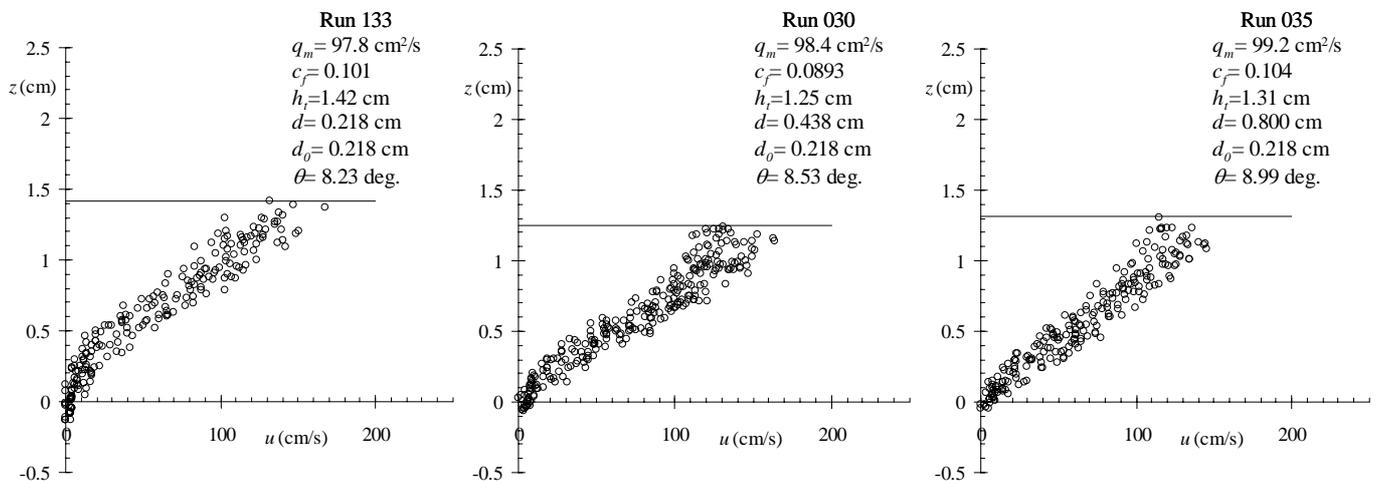


図 - 2 流速分布の比較 ( $c_f = 0.0981$ )

Key Words : debris flow, entrainment of bed sediment, erosion rate, constitutive equations

\* 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1 Phone. 077-561-2732 FAX 077-561-2667

れていることが示されている。図-3は、上流から供給される土石流の輸送濃度  $c_f = 0.10$  のときに、侵食区間が平衡状態に達したときの流速分布を示している。図において、 $d = 0.438\text{cm}$ 、 $0.8\text{cm}$  のときは、下に凸の固定床流れの分布形を呈している。

**4. 侵食限界** 図-1および図-2に示されるような土石流の侵食に及ぼす河床粒子径の影響について検討する。図-3はそれぞれ、 $d = d_0$  および  $d > d_0$  のケースにおいて土石流が河床上を流動するときの流速と応力の鉛直分布に関する模式図である。図において、せん断応力には著者らのもの<sup>2)</sup>を用いている。ここに、 $\tau_y$ ：降伏応力、 $h$ ：水深、 $\delta$ ：河床から理論河床までの距離（侵食可能深さ）である。いま、河床（ $z=0$ ）における全応力に着目して、次の長さスケール  $\delta'$  を定義する。

$$\delta' = \frac{\tau_b}{(\sigma - \rho)g} \quad (1)$$

ここに、 $\sigma$ ：砂粒子の密度、 $\rho$ ：流体の密度、 $g$ ：重力加速度である。長さスケール  $\delta'$  は、 $\delta'/\delta = k$  とすると、 $k$  は少なくとも1のオーダー程度の定数と考えられ、侵食可能深さに比例すると共に、河床材料の取り込みを次のように説明することができる。河床材料が侵食される場合には  $\delta > d$ 、一方、 $\delta \leq d$  のときには、河床材料が侵食されない。

式(1)を用いて、侵食限界時を考慮すると、無次元限界掃流力に類似した次式が得られる。

$$\frac{\delta}{d} \Big|_c \approx \frac{\delta'}{d} \Big|_c = \frac{\tau_b}{(\sigma - \rho)gd} \Big|_c = \tau_{*cd} \quad (2)$$

式(2)で定義される侵食限界  $\tau_{*cd}$  は、清水（ $c=0$ ）の流れにおいては、砂粒子の移動限界  $\tau_{*c}$  と一致するパラメータである。図-3(a)を参照すると、固定床河床における侵食限界時の河床における流動応力  $\tau_b - \tau_{yb}$  は、粒子に作用する動的な応力（流体力）に相当する。そこで、 $\tau_b - \tau_{yb} = \tau_c$  とし、降伏応力には著者らの構成則を適用すると次式が得られる。

$$\frac{\tau_{*cd}}{\tau_{*c}} = \frac{1}{G - Y}, \quad G = (\sigma/\rho - 1)\bar{c} + 1, \quad Y = (\bar{c}/c_*)^{1/5} (\sigma/\rho - 1)\bar{c} \tan \phi_s / \tan \theta \quad (3)$$

ここに、 $\bar{c}$ ：砂粒子の断面平均濃度、 $c_*$ ：砂粒子の静止堆積濃度、 $\phi_s$ ：砂粒子の静止摩擦角、 $\theta$ ：河床勾配である。図-4は、式(3)を断面平均濃度  $\bar{c}$  と  $\tau_{*cd}$  の関係で示したものである。同図には、本実験で得られた  $d > d_0$  のデータも掲載している。同図においては、図-2に示す流速分布を見ても分かるように、流れは固定床上のものである。そこで、等流状態の運動方程式に著者らの構成則を適用して求められる固定床流れの流速・粒子濃度の鉛直分布（厳密解<sup>2)</sup>）を用いて、実験データの輸送濃度を断面平均濃度に変換している。断面平均濃度  $\bar{c}$  が増加すると、侵食限界  $\tau_{*cd}$  の値は大きくなり、勾配の増加に伴い、侵食限界は減少している。清水における移動限界において勾配の増加に伴い、大きくなるといった報告<sup>3)</sup>があるが、これとは逆の傾向を示していることも興味深い。次に、計算値と実験データを比較すると、実験データには若干のばらつきは見られるが、計算値と実験データの両者の傾向は概ね一致している。

**5. おわりに** 土石流における河床材料の侵食限界について、侵食可能深さに関する長さスケールのパラメータを定義し、それを用いて侵食限界（移動限界）に関する表示式を提案した。同式の計算値は、実験データと比較すると、概ね一致し、侵食限界式の妥当性が示された。

**参考文献** 1) Egashira et al. : Phys. Chem. Earth(C), Vol.26, No. 9, 645-650, 2001, 2) 江頭ら：水工学論文集, No.41, 789-794, 1997, 3) 芦田ら：新砂防, No.97, 9-16, 1970.

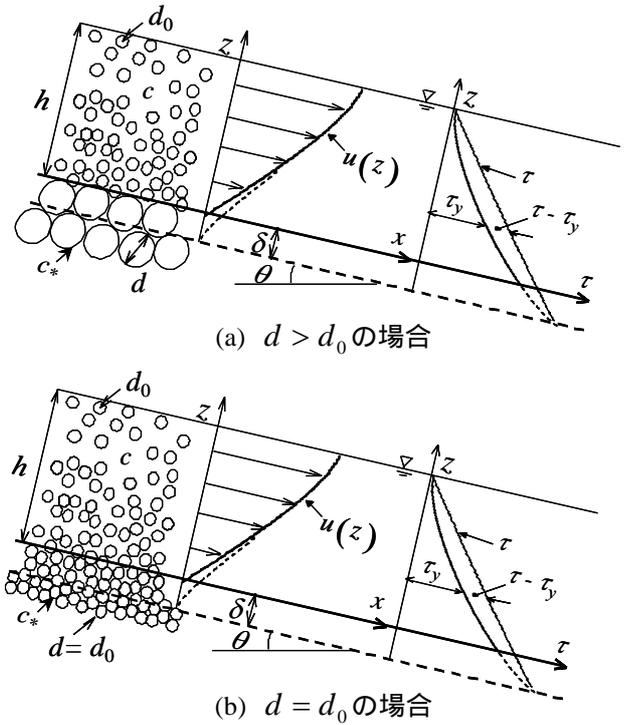


図-3 流れの模式図

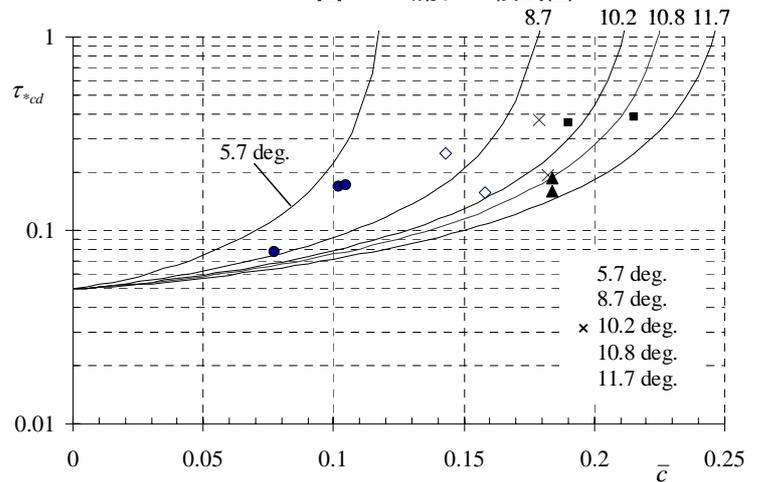


図-4 侵食限界